

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Využití energie větru v dané lokalitě,
návrh listu větrné elektrárny

Utilization of wind energy in a given location,
blade chord geometry dimensioning

Student:

Okrouhlý Martin

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání bakalářské práce

Student:

Martin Okrouhlý

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3907R009 Provoz energetických zařízení

Téma:

Využití energie větru v dané lokalitě, návrh listu větrné elektrárny
Utilization of Wind Energy in a Given Location, Blade Chord Geometry
Dimmensioning

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Proveďte výpočet, odhad výroby elektrické energie větrnou elektrárnou zadaného jmenovitého výkonu v dané lokalitě. Stanovte základní geometrii listu větrné elektrárny zadaného výkonu.

Práce bude obsahovat:

- řešební část týkající se možností využití větrné energie
- praktickou část, kde bude zpracováno
 - stanovení odhadu výroby elektrické energie pro jednotku zadaného jmenovitého výkonu v dané lokalitě
 - stanovení základní geometrie listu větrné elektrárny zadaného výkonu

Seznam doporučené odborné literatury:

RYCHETNÍK, V. *Větrné motory*, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1996. 61 s. ISBN 80-7078-281-1

HAU, E. *Wind Turbine. Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Berlin: Springer, 2005. 783 s. ISBN 978-3-642-06348-0.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité zdroje a literaturu.

V Ostravě 14.5.2017

Oravský

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
 - beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
 - souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
 - bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
 - bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- 1) beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě...*14.5.2017*.....

Okrouhlý
.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Martin Okrouhlý

Adresa trvalého pobytu autora práce: Dělnická 17., Olomouc, 779 00

ANOTACE

Využití energie větru v dané lokalitě, návrh listu větrné elektrárny. Ostrava: katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2017

V bakalářské práci je proveden návrh listu větrné elektrárny pro lokalitu nedaleko Olomouce. Lokalita se nachází u obce Luká 29 km od Olomouce. V první části práce jsem se věnoval historii větru a větrných elektráren. Následně je v práci popsána energie větru, technologie větrných elektráren a její hlavní komponenty. V neposlední řadě jsem popsal transformaci energie větru ve větrné turbíně. V praktické části je proveden výpočet rotoru větrné elektrárny a výpočet jednotlivých částí listu. Pro vybranou lokalitu je proveden výpočet dle Weibulla.

Klíčová slova: lokalita, větrná elektrárna, Weibull, rotor

ANNOTATION

Wind power utilization in a given location, design of a wind farm leaflet. Ostrava: Department of Power Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Ostrava, 2017

In the Bachelor's thesis there is a design of a wind farm for a location near Olomouc. The locality is located near Luka village, 29 km from Olomouc. In the first part I have devoted the history of wind and wind power plants. Subsequently, the thesis describes wind energy, wind power technology and its main components. Last but not least, I have described the wind energy transformation in the wind turbine. In the practical part, the wind turbine rotor calculation and calculation of the individual parts of the sheet are performed. A Weibull calculation is performed for the selected location.

Keywords: location, windmill, Weibull, rotor

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	1
1 Úvod.....	3
2 Historie energie větru a větrných elektráren	4
2.1 První větrná elektrárna	4
2.1.1 První evropská větrná elektrárna	4
2.1.2 Dánsko – vývoj pokračuje	5
2.1.3 Ropná krize jako impuls	5
3 Energie větru	6
3.1 Přírodní podmínky	6
3.2 Rychlost větru	6
3.3 Výběr vhodných lokalit.....	7
3.4 Větrné elektrárny a jejich zásah do životního prostředí	8
3.4.1 Hlučnost	8
3.4.2 Rušení zvířecí	8
3.4.3 Narušení krajinného rázu	8
4 Technologie větrných elektráren	9
4.1 Princip činnosti.....	9
4.2 Druhy větrných turbín	9
4.2.1 Odporové turbíny	10
4.2.2 Vztlakové turbíny	10
4.2.3 Horizontální turbíny.....	10
4.2.4 Vertikální turbíny.....	11
5 Hlavní komponenty větrné elektrárny	12
5.1.1 Rotor	12
5.1.2 Strojovna	12
5.1.3 Stožár (tubus).....	12
5.1.4 Základ	13

5.2	Účinnost	13
5.3	Teoretický dosažitelný výkon	14
6	Transformace energie větru ve větrné turbíně	15
6.1	Účinnost definujeme jako:	15
7	Výpočet listu větrné elektrárny	17
8	Výběr lokality	24
8.1	Analýza větrných poměrů pomocí Weibullowa rozdělení	24
9	Závěr	27
10	Použité zdroje a literatura	28
11	Přílohy.....	Chyba! Záložka není definována.

Seznam použitých zkratk a symbolů

Veličina	Jednotka	Název
P_t	W	Výkon elektrárny
ρ	kg/m ³	Hustota vzduchu
D	M	Průměr rotoru
v_1	m/s	Rychlost větru před rotorem
v_2	m/s	Rychlost větru za rotorem
v	m/s	Rychlost větru v rovině rotoru
p	Pa	Tlak
S_1	m ²	Plocha před rotorem
S_2	m ²	Plocha za rotorem
S	m ²	Plocha rotoru
c_p	-	Součinitel výkonnosti
k_B		Betzův koeficient
$P_{\text{větru}}$	MW	Výkon větru
R	M	Poloměr rotoru

c_y	-	Součinitel vztlaku
c_x	-	Součinitel odporu
Φ	rad, °	Úhel odklonění profile
B	rad, °	Úhel relativní rychlosti
A	rad, °	Úhel náběhu
D	-	Parametr rozptylu
c_s	m/s	Střední hodnota Weibullova rozdělení
T	H	Počet hodin
A_{el}	kWh	Množství vyrobené energie
K	-	Součinitel instalovaného výkonu
W_r	kWh	Celkové množství vyrobené energie za rok
P_1	kW	Jmenovitý výkon větrné elektrárny

1 Úvod

Ve své bakalářské práci se zabývám energií větru, a také nezbytnými podmínkami, které musí splňovat, aby bylo možné ji dále využívat. Rovněž objasním technické řešení větrných elektráren a rozeberu počátky energie větru jako takové či transformace energie větru ve větrné turbíně. Jelikož je transformace energie větru složitý proces, budu se zabývat podmínkami, které jsou nezbytné ke správnému chodu větrných elektráren. Vypočítám list větrné elektrárny pro různé poloměry, jeho základní parametry, údaje. Nakonec se zmíním o výběru vhodných lokalit, výpočtech parametrů oblasti pro větrnou elektrárnu jako je například četnost větru ve vybrané oblasti.

2 Historie energie větru a větrných elektráren

Lidstvo využívá energii větru od pradávna. Vítr poháněl různá zařízení a stroje, jako jsou například plachetnice, větrné mlýny a vodní čerpadla. Pomocí větrných mlýnů se energie větru využívala i na území, kde se nyní nachází náš stát. Dnes tato energie patří do technického archivu, většina větrných mlýnů je totiž přestavěna na turistické atrakce. Příkladem jsou čerpadla, jenž mají nový druh pohonu, a sice elektrické motory, anebo lodě, které nejsou závislé na větru. Energie větru, ale nevymizela, a nyní ji využíváme především na výrobu elektřiny. [1, 2, 10]

2.1 První větrná elektrárna

První větrnou elektrárnu na světě postavil Američan Charles F. Brush, který v letech 1887 a 1888 postavil první automatickou větrnou turbínu, která byla napojena na generátor elektrického proudu o výkonu 12kW. Byla postavena v Ohio. [1, 3]

– viz příloha č.1.

2.1.1 První evropská větrná elektrárna

První větrná elektrárna v Evropě byla postavena v Dánsku v roce 1891. Postavil ji a navrhl Poul la Cour. Konstrukce větrného motoru byla v roce 1930 vylepšena, tato technologie se stala převratnou, ale prosadila se až v druhé polovině 20. století. Důležitý impuls pro rozvoj větrných elektráren byly obavy z vyčerpání neobnovitelných zdrojů. Dalším velmi důležitým podnětem, díky kterému šel vývoj větrné energie dopředu, bylo embargo na vývoz ropy do průmyslově vyspělých zemí. Evropa musela hledat obnovitelné zdroje energie, a na konci 70. let byly do provozu uvedeny první větrné elektrárny, v té době byly moderní. K největším průkopníkům v oblasti větrných elektráren patřilo tedy Dánsko. [2, 3]

2.1.2 Dánsko – vývoj pokračuje

Hlavní impuls pro rozšíření větrných zdrojů energie byl velký nedostatek energetických surovin v době první světové války. Díky tomu je Dánsko jedinou zemí s nepřerušenou kontinuitou vývoje a výroby větrných elektráren. V roce 1919 dánský inženýr získal patent na větrnou elektrárnu s rotorem pracujícím na aerodynamickém principu. Toto zařízení prokázalo, že aerodynamické vrtule mají o polovinu větší účinnost, než mají klasické lopatky se stejně velkou účinnou plochou. Poté se v Dánsku rozšířily tzv. farení větrné elektrárny. Tyto zdroje energie byly uplatňovány v tzv. ostrovním provozu. Jedná se o místa bez připojení k elektrické síti a poháněly především zemědělské stroje. [3]

2.1.3 Ropná krize jako impuls

V polovině 70. let minulého století si ropní šejkové uvědomili cenu ropy a omezili těžbu, díky tomu se jim podařilo navýšit cenu ropy, která pořád rostla. Evropa byla nucena uvažovat o alternativních zdrojích energie. V Dánsku to znamenalo oživení zájmu o využití energie větru. Byla zde malá firma Nordtank, která se zabývala přepravou a skladováním ropy. Ropná krize je zasáhla hned v první vlně a byli nuceni jednat. Tehdejší vedení firmy se rozhodlo, že budou stavět větrné elektrárny. Firma se stala významným výrobcem a vývozcem těchto zařízení. [3, 10]

3 Energie větru

Tímto slovním spojením je označena oblast, která se zabývá využitím větru jako zdroje energie. Nejčastějším využitím této energie jsou dnes větrné elektrárny, které k roztočení svých vrtulí využívají síly větru. K vrtulím je připojený elektrický generátor, výkon je roven třetí mocnině rychlosti proudící masy vzduchu. Z důvodů kolísání větru nedosahují větrné elektrárny většinu času stejných hodnot generovaného výkonu. Energie větru vzniká díky sluneční energii. Vzniká zahříváním zemského povrchu, který je zahříván nerovnoměrně. Jedna z výhod energie větru je, že ji dokážeme snadno transformovat na žádanou elektřinu na rozdíl třeba od energie biomasy. Díky garanci výkupní ceny elektřiny, kterou vyprodukuje větrná elektrárna, a která je stejná již 20 let od jejich spuštění, jich u nás hodně přibývá. Jeden z dalších důvodů může být možnost získat na jejich výstavbu dotace, ale většina větrných elektráren se u nás staví bez nich. [4, 9]

– viz příloha č.2.

3.1 Přírodní podmínky

Česká republika je jeden z vnitrozemských států, pro které je typické kolísání rychlostí větru. Hlavní příčinou je globální vzdušné proudění. [9]

3.2 Rychlost větru

Je to hlavní údaj, při využívání energie větru, hlavní jednotka je [m/s] nebo [km/h]. U zemského povrchu je proudění vzduchu omezoвано terénem, vítr je zpomalován překážkami, jako jsou například stavby, kopce nebo dokonce tráva a lesy. Se stoupající výškou se rychlost větru logaritmicky navyšuje. Z toho vyplývá, že je obrovský rozdíl mezi rychlostí větru v 10 m a 100 m nad zemským povrchem. Pro proudění vzduchu je typické turbulentní proudění, které se projevuje kolísáním rychlostí a směru větru. Výsledky měření jsou průměrované za určitý časový interval. Pro měření parametrů větru existují standarty, pro rychlost a směr větru je to 10 m nad zemským povrchem. S dobrými povětrnostními podmínkami dokáže větrná elektrárna zásobovat až 2500 domácností. [6, 9]

3.3 Výběr vhodných lokalit

V případě České republiky jsou vhodná místa pro výstavbu větrných elektráren ve vyšších nadmořských výškách, převážně nad 500 m. n. m. V nižších nadmořských výškách je roční průměrná rychlost nízká, a to kolem 2 až 4 m/s. Rychlost větru je nejdůležitějším parametrem, protože energie větru roste se třetí mocninou energie větru. I sebemenší odchylka v rychlosti větru se výrazně projeví na množství získané elektřiny, protože při zdvojnásobení rychlosti, například ze 4 na 8 m/s, vzroste energie osmkrát. Měření v dané lokalitě by mělo trvat aspoň rok, a měřicí přístroj by měl být umístěn ve výšce osy, ve které se bude nacházet rotor větrné elektrárny.

– viz příloha č.3.

Před tím, než se elektrárna na daném místě začne stavět, je nutné znát všechny parametry a vstupní údaje pro danou oblast:

- Průměrnou rychlost větru včetně četnosti směru,
- Překážky a jejich parametry, které způsobují turbulentní proudění a brání nebo omezují laminární proudění,
- Nadmořskou výšku,
- Kolísání venkovních teplot nebo jiných nepříznivých metrologických jevů,
- Možnost umístění vhodné technologie,
- Geologické podmínky pro základy elektrárny (únosnost podloží, kvalita podkladu a seismická situace)
- Dostupnost lokality pro těžké mechanismy,
- Vzdálenost od přípojky vysokého napětí a velmi vysokého napětí s dostatečnou kapacitou,
- Vzdálenost od obydlí, která by měla být dostatečně velká, aby elektrárna nerušila obyvatele hlukem, nejvyšší přípustná hladina hluku je ve venkovním prostoru na obytném území ve dne 50 dB a v noci 40 dB,
- Míra zásahu do okolí přírody jednak při výstavbě samotné elektrárny, ale i při napojování přípojky, zásah do vzhledu krajiny,
- Majetkové vztahy k pozemku a postoj místních občanů a úřadů. [6, 8, 9]

3.4 Větrné elektrárny a jejich zásah do životního prostředí

I přes to, že jsou větrné elektrárny jedny z hlavních představitelů ekologické výroby elektřiny, často jim bývají vytýkány některé nedostatky. Obvykle je to neoprávněně, protože současné elektrárny jsou mnohem pokročilejší a modernější, než byly ty před deseti lety. [9]

3.4.1 Hlučnost

U nynějších strojů je tento parametr už nižší. Elektrárny jsou stavěny v dostatečné vzdálenosti od vesnic, měst a obydlí. Hlukové studie jsou nezbytnou součástí dokumentace, která je nutná ke schválení stavebního povolení. Nevhodně umístěná elektrárna může působit problémy a nepříjemnosti, lze však omezit jejich provoz na základě měření. Rychloběžné větrné elektrárny jsou malé a poměrně hlučné. [9]

3.4.2 Rušení zvěře

Rušení zvěře v praxi nenastává. Hlavním důkazem jsou ovce a krávy, ale také divoká zvěř, která se pase v jejich blízkosti. Elektrárny jsou dobrým orientačním bodem pro ptáky, což má za následek zvýšení hnízdících ptáků v jejich blízkosti. Další důvod je ten, že rotory větrných elektráren mohou rušit dravé ptáky. Ke kolizím ptáků s elektrárnou dochází zřídka, převážně v noci, anebo když je snížená viditelnost kvůli mlze. [9]

3.4.3 Narušení krajinného rázu

Stejně jako všechno ostatní, jednomu se elektrárny líbí a druhému zase ne. Česká krajina má tu výhodu, že je zde velmi těžké najít místa, kde by elektrárna narušila panorama přírody. Elektrárny mohou pomoci snižovat počet stožárů, jelikož na stožár elektrárny můžeme umístit telekomunikační zařízení. Bohužel ekonomická životnost elektrárny, je pouhých 20 let, proto se jedná pouze o dočasnou stavbu. [9]

4 Technologie větrných elektráren

Větrné motory se dělí na dva základní druhy vztlkové a odporové. Elektrárny s vodorovnou osou otáčení jsou nejrozšířenější, pracují pomocí vztlkového principu, jsou zde vrtule podobným letecké vrtuli a vítr je obtéká. Historické větrné mlýny nebo také větrná kola vodních čerpadel, pracovaly na podobném principu. Nejlepší parametry mají elektrárny třílisté, ale testovali se i jednolísté, dvoulisté, čtyřlísté. Pak jsou tu elektrárny se svislou osou otáčení, které pracují pomocí odporového principu nebo na vztlkovém principu. Výhodou elektráren vztlkových, které mají svislou osu otáčení, je to, že mohou dosahovat vyšší rychlosti otáčení, a díky tomu mají i vyšší účinnost. Pracují při nižších rychlostech větru a není třeba je natáčet podle směru větru. Tyto elektrárny se donedávna nepoužívaly. Hlavním důvodem bylo vyšší dynamické namáhání, a z toho vyplývající nižší životnost elektrárny. Konstrukčně se tento problém podařilo částečně odstranit. Tyto elektrárny mají menší hlučnost. [9, 5, 4, 12]

– viz příloha č.4.

4.1 Princip činnosti

Větrná turbína transformuje sílu proudícího vzduchu, který roztáčí listy rotoru a rotační pohyb se mění na mechanickou energii. Ta je dále díky generátoru transformovaná na energii elektrickou. Listy rotoru mají specifické vlastnosti a tvary. Buď pracují na principu vztlkové nebo odporové síly. [5, 8, 4]

4.2 Druhy větrných turbín

Turbíny se dělí podle principu fungování na odporové a vztlkové. [4]

4.2.1 Odporové turbíny

Co se týče historie, tak jsou starší než vztlakové. V dnešní době se už téměř nepoužívají, a to z důvodu nižší účinnosti. Využívají rozdíl působících sil na lopatky. Tohoto efektu se dá docílit pomocí dvou způsobů. [4, 12]

1) Různým tvarem lopatek

Lopatka má různý aerodynamický odpor, který je závislý na směru proudu vzduchu. Jedním z nejtypičtějších příkladů jsou lopatky ve tvaru mísky. [4, 12]

2) Natočením lopatek

Tohle řešení je komplikovanější než předchozí řešení, ale dosahuje se zde vyšších účinností, a to díky tomu, že se plocha lopatek natáčí v závislosti na směru proudu větru a pozici rotoru. [4]

4.2.2 Vztlakové turbíny

Dnes se tyto turbíny řadí k nepoužívanějšímu typu turbín. Pracují na principu síly, která vzniká na rotorovém listu při obtékání vzduchu. Toto je možné jen díky speciálnímu tvaru lopatek, které jsou podobné jako křídla letadel. Na obrázku můžeme vidět jak všechno probíhá. Vidíme zde dvě síly, které působí na list rotoru. Jedná se o vztlakovou sílu, která má za následek rotační pohyb turbíny, ale i nežádoucí sílu odporovou, která působí proti pohybu. [4, 12] – viz příloha č.5.

4.2.3 Horizontální turbíny

Využívají se nejvíce, a to z důvodu vysoké účinnosti, která je něco kolem 48 % oproti vertikálním turbínám. Musí být orientovány proti směru větru, a proto se u elektráren menších rozměrů využívají tzv. směrové lopatky. U těch největších jsou to pak většinou servo motory a větrové senzory. Většina z nich obsahuje převodové ústrojí, které má za úkol zvýšit rotační rychlost pomaloběžného rotoru na požadovanou, která bude vhodná pro pohon generátoru. [4, 12]

4.2.4 Vertikální turbíny

Mají srovnatelný výkon s horizontálními turbínami, ale o něco nižší účinnost. Ta se pohybuje kolem 38 %. Jejich hlavní přednost je, že není nutné měnit jejich směr, a proto se využívá v oblastech, kde se často mění směr větru. Obrovská výhoda těchto turbín spočívá v tom, že mohou mít umístěný generátor a převodové ustrojí na zemském povrchu, což značně zjednodušuje i usnadňuje jejich údržbu. Oproti horizontálním turbínám zabírají méně místa, a lze je umístit blíže k sobě bez toho, aniž by se navzájem ovlivňovaly. Nesmíme zapomenout na to, že jsou méně hlučné. Ovšem jejich velkou nevýhodou jsou její pořizovací náklady, které jsou vyšší než u horizontálních turbín. [4, 12, 14]

5 Hlavní komponenty větrné elektrárny

Na obrázku můžeme vidět komponenty elektrárny, která má horizontální osu otáčení a otočný mechanismus turbíny. [5, 8]

– viz příloha č.6.

Větrná elektrárna je sestavena ze čtyř hlavních částí a to z rotoru, strojovny, stožáru a základu jak je vidět na schematickém obrázku. [15]

– viz příloha č.7.

5.1.1 Rotor

Je to druh zařízení, které umožňuje přeměnu kinetické energie větru na mechanickou. V současné době se používají převážně třílisté a jsou uchyceny na hlavu rotoru. Průměry rotoru mohou dosahovat až 130 m. Listy rotoru vyráběné především ze sklolaminátu a jsou konstruovány tak, aby jejich tvar umožnil co nejlepší transformaci energii větru na rotor. [15]

5.1.2 Strojovna

V gondole je umístěna celá strojová část větrné elektrárny. Gondola se nachází na vrcholu stožáru větrné elektrárny. I když má každý výrobce jiný princip soustrojí, tudíž i vybavení strojovny tak nejčastěji je rotor umístěn na hřídeli, ta má za úkol přenášet výkon rotoru do převodovky. Převodovka následně zvyšuje otáčky pro generátor, který pohání. [15]
– viz příloha č.6.

5.1.3 Stožár (tubus)

Stožáry v dnešní době dosahují výšek od 40 do 110 m. Jsou i výjimky, které dosahují větších, menších hodnot. Stožár se skládá z více částí, jedna tahle část má obvykle délku 20 m. Je to hlavní část nosného systému větrné elektrárny. Rotor a gondola jsou umístěny na

stožáru tak, aby se mohly otáčet kolem vertikální osy do směru větru. Můžou se vyrábět z oceli nebo betonu. Se stožárem je úzce spojen základ pro větrnou elektrárnu. Pomocí stožáru se může obsluha dostat do strojovny kvůli případným opravám, kontrolám. [15]
– viz příloha č.8.

5.1.4 Základ

Základ je důležitá část větrné elektrárny, již několik týdnů před samotnou výstavbou větrné elektrárny. Je to nejtěžší část větrné elektrárny (hmotnost bývá přes 1000tun), ale po výstavbě není prakticky vidět. Před samotnou výstavbou základu se musí provádět důkladný geologický průzkum, aby se zjistila stabilita prostředí ve spodních vrstvách zeminy. VtE je totiž velmi vysoká stavba, která díky svému hmotovému rozložení je velmi citlivá na vychýlení (odklon od svislice) a s tím související stabilitu. Základ může mít několik tvarů: čtvercový, kruhový nebo šestiboký. Základ větrné elektrárny mohou tvořit i pilíře, které se používají u větrných elektráren stavěných na moři. [15]
– viz příloha č.9.

5.2 Účinnost

V turbíně se mění kinetická energie větru na energii otáčivého pohybu. Jak vyplývá ze zákona o zachování hmoty, v praxi není možné, aby všechna energie větru byla využita. Vzduch, který dosedne na lopatky větrné turbíny je poté opouští. Betzovo pravidlo udává maximální využití větru ve větrné turbíně. Je nutné přičíst veškeré ztráty, ať už způsobené třením a odporem listů rotoru, anebo převodové ztráty či ztráty v generátoru a měniči. Celková účinnost transformace větrné energie na energii elektrickou, je pak snížena o ztráty mechanické a elektrické. [4, 7]
– viz příloha č.10.

5.3 Teoretický dosažitelný výkon

Teoretický dosažitelný výkon větrné elektrárny je popsán rovnicí.

$$P_t = k_B * \rho * \frac{v^3}{2} \quad (1)$$

, kde

P_t – výkon elektrárny [W]

k_B - Betzův koeficient roven 0,59

ρ - hustota vzduchu [kg/m³]

v - rychlost proudění vzduchu [m/s]

Pro výkon reálné turbíny platí :

$$P = C_p * \rho * \frac{v^3}{2} * \pi * \frac{D^2}{4}, \text{ kde} \quad (2)$$

C_p - součinitel výkonnosti, v ideálním případě roven 0,59

D – průměr rotoru [m]

[7]

6 Transformace energie větru ve větrné turbíně

Rotory větrné turbíny transformují určitou část kinetické energie větru na energii mechanickou. Kdyby se přeměnila veškerá energie větru na energii mechanickou, znamenalo by to úplné zastavení proudění větru přes turbínu, a z toho jasně vyplývající účinnost 0 %. Z toho důvodu je tu optimální snížení rychlosti proudícího vzduchu za rotorem, a právě tehdy dosáhneme maximální účinnosti. Jak plyne ze zákona zachování hmoty a rovnice kontinuity je jasné, že před i za rotorem musí být stejný průtok. Vzduch, který se nachází za rotorem, protéká větším průřezem, a to z toho důvodu, že je pomalejší. Ten, který se nachází za rotorem představuje překážku pro okolní rychlejší proudící vzduch, který tuhle vzniklou překážku obtéká, pak přes rotor proudí mnohem méně potenciální energie, než odpovídá ploše rotoru. Můžeme dokázat, že největší efektivita přeměny kinetické energie na mechanickou je při proudění vzduchu přes větrnou turbínu, když rychlost vzduchu za turbínou je rovna jedné třetině rychlosti vzduchu před turbínou. Jestliže definujeme roviny S_1 a S_2 v dostatečně velké vzdálenosti od roviny S , v neovlivněné vzdálenosti, jak můžeme vidět na obrázku, tak tlak v rovinách S_1 a S_2 je stejný. [7, 8, 14] – viz příloha č.11.

6.1 Účinnost definujeme jako:

$$\eta_i = \frac{\text{výkon rotoru}}{\text{výkon větru}} \quad [-] \quad (3)$$

Následně jednotlivé rychlosti:

v_1 - rychlost větru před rotorem

v_2 - rychlost větru za rotorem

v - rychlost větru v rovině rotoru, která je střední hodnotou rychlosti před a za rotorem

p - tlak

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

Platí zde rovnice kontinuity, která je:

$$v_1 * S_1 = v * S = v_2 * S_2$$

Mechanická energie, která je získaná na rotoru, je rovna změně kinetické energie proudu vzdušiny, z rozdílů kinetické energie vzduchu, která se nachází před a za rotorem.

$$P = \frac{\Delta E_k}{t} = \frac{\frac{1}{2} * m * (v_1^2 - v_2^2)}{t} = \frac{1}{2} * \rho * S * v * (v_1^2 - v_2^2) \quad [\text{J}] \quad (5)$$

Po dosazení za

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad \text{a} \quad \dot{m} = \rho * S * v \quad (6)$$

Výkon rotoru pak po dosazení:

$$P_{rotoru} = \frac{1}{4} * \rho * S * (v_1 + v_2) * (v_1^2 - v_2^2) \quad [\text{kW}] \quad (7)$$

Pro účinnost pak můžeme psát:

$$\eta_i = \frac{\frac{1}{2} * \rho * S * \frac{v_1 + v_2}{2} * (v_1^2 - v_2^2)}{\frac{1}{2} * \rho * S * v_1^3} \quad [-] \quad (8)$$

Z této rovnice plyne, že maximální účinnost transformace energie je dosaženo, když proměnnou je rychlost v_2 , případě že rychlost větru před a za rotorem je v poměru:

$$v_2 = \frac{1}{3} * v_1 \quad [\text{m/s}] \quad (9)$$

$$\eta_{i,max} \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3} \quad [-] \quad (10)$$

Maximální možná účinnost je 0,5926. Tuhle účinnost nazýváme po velmi významném vědci, který působil v oboru větrné energetiky, Betzova účinnost. [7]
– viz příloha č.12.

7 Výpočet listu větrné elektrárny

Výkon elektrárny: $P = 1 \text{ MW} = 1000 \text{ kW}$

Účinnost: $\eta_{\text{obvodová}} = 0,4$
 $\eta_{\text{mechanická}} = 0,98$
 $\eta_{\text{elektrická}} = 0,97$

Hustota vzduchu:

$$\rho_{\text{vzduchu}} = \frac{101325}{287 \cdot (273,15 + 15)} = 1,22 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (11)$$

Jako návrhovou rychlost větru volím: – viz příloha č.13.

$$v = 10 \quad [\text{m/s}]$$

Výkon větru:

$$P_{\text{větru}} = \frac{P}{\eta_{\text{obvodová}} \cdot \eta_{\text{mechanická}} \cdot \eta_{\text{elektrická}}} = \frac{1000}{0,4 \cdot 0,98 \cdot 0,97}$$
$$P_{\text{větru}} = 2629 \quad [\text{kW}] = 2,629 \quad [\text{MW}] \quad (12)$$

Poloměr rotoru:

$$R = \sqrt{\frac{P_{\text{větru}} \cdot 2}{\pi \cdot \rho_{\text{vzduchu}} \cdot v^3}} = \sqrt{\frac{2,62 \cdot 2}{\pi \cdot 1,22 \cdot 15^3}} = 36,97 \Rightarrow 37$$
$$R = 36,97 \Rightarrow 37 \quad [\text{m}] \quad (13)$$

Rychlostní součinitel:

$$\lambda = \frac{u_R}{v} \text{ optimální hodnota pro třílistý rotor je } \lambda_{\text{optimální}} = 3,75 \quad (14)$$

-viz příloha č.14.

Rychlostní součinitel ovlivňuje:

- počet lopatek rotoru z
- profil, šířku a úhel náběhu křídel
- počet otáček
- dosažitelnou celkovou účinnost
- osový tlak
- průběh charakteristik

Z toho následně vypočítám:

Rychlost na konci listu:

$$u_R = \lambda * v = 3,75 * 10 = 37,5 \quad [\text{m/s}] \quad (15)$$

Úhlová rychlosti:

$$\omega = \frac{v(R)}{R} = \frac{37,5}{37} = 1,01 \quad [\text{s}^{-1}] \quad (16)$$

Následující výpočet je zjednodušený a počítaný v MS Excel. Uvádím postup výpočtu.

1. Rozdělení poloměru listu na jednotlivé dílčí poloměry s krokem 1m (rozsah 4,5 m až 37 m). Je počítáno od poloměru 4,5m z důvodu umístění strojovny a minimálního energetického zisku.

-viz příloha č.15.

2. Výpočet rychlosti u pro jednotlivé poloměry

$$u(R_i) = \omega * R \quad [\text{m/s}] \quad (17)$$

3. Výpočet rychlosti relativní w pro jednotlivé poloměry

$$w(R_i) = \sqrt{u(R_i)^2 + \left(\frac{2}{3} * v\right)^2} \quad [\text{m/s}] \quad (18)$$

4. Výpočet úhlu β, γ – (β úhel relativní rychlosti) + převod na radiány, stupně

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\frac{2}{3} * v}{w}\right) \quad [\text{rad}, ^\circ] \quad (19)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\frac{2}{3} * v}{w}\right) \quad [\text{rad}, ^\circ] \quad (20)$$

-viz příloha č.16.

$$\beta = \alpha + \varphi$$

φ – úhel odklonění profile

β – úhel relativní rychlosti

α – úhel náběhu

5. Výpočet délky L pro jednotlivé poloměry

-viz příloha č.17.

$$L(R_i) = (\eta_{\text{obvodová}} * \eta_{\text{mechanická}} * \eta_{\text{elektrická}}) * \frac{16}{27} * \frac{2 * \pi * v^3 * R_i}{z * c_y * w(R_i)^2 * u(R_i) * \cos\gamma}$$

[m] (21)

z – počet listů – 3

c_y – součinitel vztlaku 0,87, -pro zvolený profil NACA 4212 viz příloha č.17. na obrázku je poměr $c_y/c_x = 0,87 = \max$

6. Výpočet plochy dS

$$dS = L(R_i) * dR$$

[m²] (22)

7. Výpočet odporové síly dílčí plochy

$$F_x = \frac{1}{2} * \rho * S(R_i) * c_x * w(R_i)^2$$

[N] (23)

- viz příloha č.18. z obrázku je zřejmé, že $c_x = 0.007$

8. Výpočet vztlakové síly dílčí plochy

$$F_y = \frac{1}{2} * \rho * S(R_i) * c_y * w(R_i)^2$$

[N] (24)

9. Výpočet obvodové síly dílčí plochy

$$F_u = F_x * \cos(\gamma) + F_y * \sin(\gamma)$$

[N] (25)

ρ ... hustota vzduchu

c_y ... součinitel vztlaku

c_x ... součinitel odporu

S ... plocha

w ... relativní rychlost

10. Výpočet dílčích momentů

$$M_i = F_{ui} * R_i$$

[N.m] (26)

11. Výpočet dílčích výkonů

$$P_i = \omega * M_i \quad [W] \quad (27)$$

Celkový výkon je dán součtem dílčích výkonů, nebo součin dílčích ploch momentů vynásobený úhlovou rychlostí.

Výpočet listu (ukázka výpočtu) :

List větrné elektrárny byl rozdělen na segmenty o šířce $dr = 0,5$ m, byly pro segmenty vypočítány základní geometrické parametry, silové účinky a výkon. Byla vytvořena výpočtová tabulka v MS Excel, kde jsou vypočteny všechny hodnoty pro celou délku listu větrné elektrárny a to v intervalu 1 m.

Byl zvolen aerodynamický profil NACA 4412, se kterým je dále pracováno, pro zjednodušení výpočtu, na celé délce listu.

Pro ukázkou si ukážeme výpočet hodnot pro segment ve vzdálenosti (délku listu) 10,5 m, stejný postup výpočtu je použit pro každý řádek tabulky.

Tabulka: -viz příloha č.19.

Poloměr rotoru: $R_i = 10,5$ m

Unášivá rychlost: Je část celkové rychlosti uvažovaného hmotného bodu.

$$u = R_i * \omega = 10,5 * 1,01 = 10,6 \quad [\text{m/s}] \quad (28)$$

Relativní rychlost: Relativita pohybu znamená, že pohyb je relativní, neboli závisí na tom, kdo jej pozoruje – závisí na vztažné soustavě, vzhledem ke které se pohyb zkoumá.

$$w = \sqrt{u^2 + \left(\frac{2}{3} * v\right)^2} = \sqrt{10,605^2 + \left(\frac{2}{3} * 10\right)^2} = 12,5 \quad [\text{m/s}] \quad (29)$$

Úhel beta:

$$\beta = \arcsin \frac{\left(\frac{2}{3} * v\right)}{w} = \arcsin \frac{\left(\frac{2}{3} * 10\right)}{12,526} = 0,532 \text{ [rad]} = 32,2 \quad [^\circ] \quad (30)$$

Úhel gama: Jde o úhel nastavení profilu.

$$\gamma = \arccos \frac{\left(\frac{2}{3} * v\right)}{w} = \arccos \frac{\left(\frac{2}{3} * 10\right)}{12,526} = 1,011 \text{ [rad]} = 57,8 \quad [^\circ] \quad (31)$$

Hloubka tětivy profilu: Tětiva profilu je velmi důležitá vztažná čára, pokládáme ji vztažnou osou profilu. K tětivě vztahujeme významné úhly.

$$L(R_i) = \eta_{obv} * \eta_{mech} * \eta_{el} * \left(\frac{16}{27}\right) * \frac{2 * \pi * v^3 * R_i}{z * c_y * w^2 * u * \cos \gamma} \quad [\text{m}] \quad (32)$$

$$L(R_i) = 0,4 * 0,98 * 0,97 * \left(\frac{16}{27}\right) * \frac{2 * \pi * 10^3 * 10,5}{3 * 0,87 * 12,526^2 * 10,607 * \cos 1,011}$$

$$L(R_i) = 6,5 \quad [\text{m}]$$

Plocha elementu: Plocha počítaného úseku.

$$dS = L(R_i) * dR = 6,446 * (10,5 - 9,5) = 6,5 \quad [\text{m}^2] \quad (33)$$

Síla odporová: Jedná se o fyzikální veličinu, vyjadřující velikost odporu proti pohybu těles v něm (v našem případě list rotoru).

$$F_x = \frac{1}{2} * \rho * S * c_x * w^2 \quad [\text{N}] \quad (34)$$

$$F_x = \frac{1}{2} * 1,225 * 6,446 * 0,007 * 12,526^2 = 4,5 \quad [\text{N}]$$

Síla vztlaková: Je síla, aerodynamická působící na daný geometrický útvar, která nadnáší těleso při pohybu v plynu.

$$F_y = \frac{1}{2} * \rho * S * c_y * w^2 \quad [\text{N}] \quad (35)$$

$$F_y = \frac{1}{2} * 1,225 * 6,446 * 0,87 * 12,526^2 = 538,9 \quad [\text{N}]$$

Síla obvodová:

$$F_u = F_x * \cos(\gamma) + F_y * \sin(\gamma) \quad [\text{N}] \quad (36)$$

$$F_u = 4,336 * \cos(1,011) + 538,94 * \sin(1,011) = 459,1 \quad [\text{N}]$$

Moment: Vyjadřuje působení síly na bod vzdálený od osy otáčení.

$$M = F_{ui} * R_i = 459,019 * 10,5 = 4819,7 \quad [\text{Nm}] \quad (37)$$

Výkon elementu:

$$P = M_i * \omega = 4819,699 * 1,01 = 4867,9 \quad [\text{W}] \quad (38)$$

8 Výběr lokality

Vhodná lokalita se nachází nedaleko Olomouce poblíž vesničky Luká. Pro můj projekt jsem si vybral kopec, který je na západní straně vesnice a je ve výšce 500 m.n.m. V dané lokalitě panují přívnětivé povětrnostní podmínky. K místu vede polní cesta.

8.1 Analýza větrných poměrů pomocí Weibullova rozdělení

Rychlost větru je nejdůležitějším faktor při využívání energie větru. Rychlost větru se mění v čase, z toho důvodu je při dlouhodobém sledování popisována jako střední rychlost větru c_s za jeden rok. Co se týče střední rychlosti tak je to jen informativní hodnota, pokud není doplněna o rozdělené četnosti větru. Tento druh rozdělení lze vyjádřit sloupcovým grafem.

V grafu se ke každé rychlosti větru přiřadí číslo, které vyjadřuje procentuální podíl vybrané rychlosti na době, po kterou byl vítr měřen.

Stanovení větrných podmínek bylo uskutečněno s pomocí softwaru „Větrný atlas České republiky“. Tento program byl vytvořen Ústavem fyziky atmosféry Akademie věd ČR.

Pro naši lokalitu budeme počítat s průměrnou rychlostí větru 4.3 [m/s].

Na modelování jsme použili Weibullovo rozdělení. Jeho distribuční funkce je definována:

$$F(c) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{c}{d}\right)^k\right] \quad [\text{m/s}] \quad (39)$$

Parametry „ d “ a „ k “ jsou kladné parametry rozdělení. Parametr „ k “ nám určuje tvar rozdělení a parametr „ d “ nám udává měřítko hodnot, kterých funkce hustoty Weibullova rozdělení nabývá. Pokud za parametr „ k “ zvolíme 2, potom se Weibullovo rozdělení bude shodovat s rozdělením Rayleighovým. V případě, že za parametr „ k “, zvolíme 1, potom Weibullovo rozdělení bude exponenciálním. Parametr rozptylu „ d “ stanovíme ze vztahu pro střední hodnotu Weibullova rozdělení :

$$c_s = d * r * \left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad [\text{m/s}] \quad (40)$$

Po úpravě získáme vztah pro určení parametru rozptylu „d”:

$$d = \frac{c_s}{r*(1+\frac{1}{m})} = \frac{4.3}{r*(1+\frac{1}{2})} = \frac{4.3}{0,886227} \quad [-] \quad (41)$$

$$d = 4,85203$$

Kde r je Gama funkce a tuto funkci určujeme z tabulek nebo jako v našem případě pomocí Excelu. Funkce v Excelu má tvar EXP (GAMMALN(1/2+1)). Celou větrnou analýzu si nyní sepíšeme do tabulky. Bude obsahovat hranice tříd [m/s], průměr tříd [m/s], Weibullovo rozdělení, počet hodin v roce, výkon větrné elektrárny a množství vyrobené energie. Budeme počítat s 10% ročním bezvětřím, to znamená, že počítáme s 328,5 dni v roce. Větrná elektrárna ENERCON E-44, začíná pracovat při rychlosti větru 3 [m/s]. S těmito fakty budeme muset počítat při výpočtech v tabulce.

-viz příloha č.20.

Funkci F(c) vypočteme v programu Excel, díky vestavěné funkci, která má tvar Weibulla(hranice tříd;k;d;1)

Kde: k - je to konstanta pro naše podmínky volíme 2

D -parametr rozptylu v našem případě 4,3

Počet hodin značených t jsi pro jednotlivé četnosti větru vypočteme ze vzorce:

$$t = 328,5 * 24 * \Delta F(c) \quad [h] \quad (42)$$

kde: -328,5 - počet hodin v roce po odečtení bezvětří zhruba 10%

-24 - počet hodin za den – rozdíl

- ΔF(c) pro rychlost větru 0,5 a 0,25, dále 0,75 a 0,5 atd.

-viz příloha č.21.

Výkon větrné elektrárny značený „Pel“ stanovíme z výkonnostní křivky (-viz příloha č.22.), která vychází z dat od výrobce větrné elektrárny. Větrná elektrárna Enercon E-44 začíná pracovat při rychlosti větru 3 [m/s], výpočty proto začínají touto rychlostí větru. -viz příloha č.20.

Nejdůležitějším faktorem je množství vyrobené energie značené „Ael“. Toto množství vyrobené energie získáme tím, že vynásobíme výkon větrné elektrárny při dané rychlosti větru s dobou trvání těchto větrných podmínek. Pro výpočet Ael použijeme jednoduchý vztah:

$$A_{el} = P_{el} * t \quad [\text{kWh}] \quad (43)$$

Kde: -P_{el}-výkon větrné elektrárny [kW]
 -t-počet hodin v roce pro danou rychlost větru [h]

Veškeré výpočty jsou vypočteny v tabulce (-viz příloha č.20.)

Součinitel využití instalovaného výkonu K spočteme ze vztahu:

$$K = \frac{W_r}{P_1} = \frac{577\,948}{1\,000 * (365 * 24)} = 0,0659 \quad [-] \quad (44)$$

Kde: W_r-celkové množství vyrobené energie za rok [kWh]
 P₁-jmenovitý výkon větrné elektrárny [kW]
 (365*24)-počet hodin v roce [h]

9 Závěr

Ve své bakalářské práci jsem popsal větrné turbíny z hlediska historického vývoje, technické struktury i mechanického principu či působení jednotlivých sil na lopatky turbíny. Popsal jsem technologii větrných elektráren a na jakém principu vlastně pracují. V práci je popsán způsob transformace větrné energie v turbíně. Na základě zadaných parametru výkonu, předpokládaných účinností dílčích technologií, jmenovitých parametrů rychlosti větru a navrženého aerodynamického profilu jsem provedl výpočet základních geometrických ukazatelů listu větrné elektrárny. Pro vybranou lokalitu jsem provedl pro danou turbínu výpočet, odhad, výroby elektrické energie v průběhu roční periody. Byl využit „Větrný atlas“, výpočet dává podklady pro úvahy nad možným umístěním VE s ohledem na ekonomiku provozu. Práce je základem pro další analýzy s ohledem na konstrukci a efektivitu výroby el. energie v dané lokalitě.

10 Použité zdroje a literatura

Zdroje

- [1] Využívání větrné energie ve světě. *Http://www.pro-vetrniky.cz/* [online]. [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://www.pro-vetrniky.cz/cs/fakta-o-vetrnych-elektrarnach/vetrne-elektrarny-ve-svete.html>
- [2] Z historie využívání energie větru v českých zemích. *Http://www.csve.cz/* [online]. [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/z-historie-vyuzivani-energie-vetru-v-ceskych-zemich/36>
- [3] ING. BŘETISLAV KOČ. Z historie větrných elektráren. *Http://www.odbornecasopisy.cz/* [online]. 2017 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/z-historie-vetrnych-elektraren--13364>
- [4] HÁJEK, Martin. Větrné elektrárny- princip, rozdělení. *Http://oenergetice.cz/* [online]. 2015 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/typy-elektraren/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni/>
- [5] Systémové komponenty. *Http://www.enercon.de/* [online]. [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://www.enercon.de/technologie/komponenten/>
- [6] ING. JAROSLAV BENEDIKT. *VYUŽITÍ ENERGIE VĚTRU* [online]., 10 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/21_Krajina-a-ZP_54-55/54_IUT/141_Vyuziti-energie-vetru---Benedikt---P0.pdf
- [7] SZELIGA, Zbyszek. Obnovitelné zdroje energie – energie větrná, větrné motory. *Http://kke.zcu.cz/* [online]. 2012 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old_web/_files/projekty/enazp/21/IUT/138_OZE_vitr_v_oda_palivove_clanky_-_P3.pdf
- [8] SKORPÍK, Jiří. *Využití energie větru: Konstrukce větrné elektrárny* [online]. [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/vyuziti-energie-vetru.html>
- [9] BERANOVSKÝ, Jiří, Monika KAŠPAROVÁ, František MACHOLDA, Karel SRDEČNÝ a Jan TRUXA. *ENERGIE VĚTRU: Přírodní podmínky* [online]. Dostupné z: <http://ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-vetru>
- [10] *Z historie využívání energie větru v českých zemích* [online]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/z-historie-vyuzivani-energie-vetru-v-ceskych-zemich/36>
- [11] *Historie využití větrné energie* [online]. [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/90/02.h>

Literatura

- [12] Crome, H.: Technika využití energie větru - svépomocná stavba větrných zařízení. HEL, Ostrava 2002.
- [13] Hallenga, U.: Malá větrná elektrárna. HEL, Ostrava, 1999.
- [14] Rychetník, V., Pavelka, J., Janoušek, J.: Větrné motory a elektrárny. ČVUT, Praha, 1997.
- [15] ČSVE [online]. c2012, [cit. 2012-04-02]. Dostupné z:
<<http://www.csve.cz/cz/kategorie/vzdelavani/13>>.